

周天军, 李立娟, 李红梅, 等. 气候变化的归因和预估模拟研究. 大气科学, 2008, 32 (4): 906~922

Zhou Tianjun, Li Lijuan, Li Hongmei, et al. Progress in climate change attribution and projection studies. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences* (in Chinese), 2008, 32 (4): 906~922

# 气候变化的归因和预估模拟研究

周天军 李立娟 李红梅 包庆

中国科学院大气物理研究所大气科学和地球流体力学数值模拟国家重点实验室, 北京 100029

**摘要** 本文总结了近五年来中国科学院大气物理研究所在气候变暖的归因模拟与预估研究上的主要进展。研究表明, 利用海温、太阳辐射和温室气体等实际强迫因子驱动大气环流模式, 能够较为合理地模拟全球平均地表气温在 20 世纪的演变, 但是难以模拟出包括北大西洋涛动/北极涛动和南极涛动在内的高纬度环流的长期变化趋势。利用温室气体和硫酸盐气溶胶等“历史资料”驱动气候系统模式, 能够较好地模拟出 20 世纪后期的全球增暖, 但如果要再现 20 世纪前期 (1940 年代) 的变暖, 还需同时考虑太阳辐射等自然外强迫因子。20 世纪中国气温演变的耦合模式模拟技巧, 较之全球平均情况要低; 中国气候在 1920 年代的变暖机理目前尚不清楚。对于近 50 年中国东部地区“南冷北暖”、“南涝北旱”的气候变化, 基于大气环流模式特别是区域气候模式的数值试验表明, 夏季硫酸盐气溶胶的负辐射效应超过了温室气体的增暖效应, 从而对变冷产生贡献。但现有的数值模拟证据, 不足以说明气溶胶增加对“南涝北旱”型降水异常有贡献。20 世纪中期以来, 青藏高原主体存在明显增温趋势, 温室气体浓度的增加对这种增暖有显著贡献。多模式集合预估的未来气候变化表明, 21 世纪全球平均温度将继续增暖, 增温幅度因不同排放情景而异; 中国大陆年均表面气温的增暖与全球同步, 但增幅在东北、西部和华中地区较大, 冬季升温幅度高于夏季、日最低温度升幅要强于日最高温度; 全球增暖有可能对我国中东部植被的地理分布产生影响。伴随温室气体增加所导致的夏季平均温度升高, 极端温度事件增多; 在更暖的气候背景下, 中国大部分地区总降水将增多, 极端降水强度加大且更频繁发生, 极端降水占总降水的比例也将增大。全球增暖有可能令大洋热盐环流减弱, 但是减弱的幅度因模式而异。全球增暖可能不是导致北太平洋副热带-热带经圈环流自 20 世纪 70 年代以来变弱的原因。文章同时指出了模式预估结果中存在的 uncertainty。

**关键词** 气候变化 数值模拟 归因 预估

**文章编号** 1006-9895 (2008) 04-0906-17

**中图分类号** P461

**文献标识码** A

## Progress in Climate Change Attribution and Projection Studies

ZHOU Tianjun, LI Lijuan, LI Hongmei, and BAO Qing

*State Key Laboratory of Numerical Modeling for Atmospheric Sciences and Geophysical Fluid Dynamics, Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029*

**Abstract** This paper summarizes the progress of climate change attribution and projection modeling studies achieved by scientists in the Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences, over recent five years. When forced by a combination of sea surface temperature, solar radiation, and green houses gases, the atmospheric general

**收稿日期** 2008-02-22, 2008-03-17 收修定稿

**资助项目** 国家自然科学基金资助项目 40523001、40221503、40625014, 国家重点基础研究发展规划计划项目 2006CB403603, 中国气象局气候变化专项项目 CCSF2007-32

**作者简介** 周天军, 男, 1969 年出生, 理学博士, 研究员。主要从事海气耦合模式研究、大洋环流和海气相互作用数值模拟、东亚气候变化及亚澳季风可预报性研究。E-mail: zhoutj@lasg.iap.ac.cn

circulation models can reasonably reproduce the evolution of global mean surface air temperature (SAT) during the 20th century, however, fail in capturing the long term trend of high latitude circulations measured by the North Atlantic Oscillation/Arctic Oscillation, or Antarctic Oscillation index. Examinations on the variations of SAT over China and the globe in the 20th century simulated by 19 coupled climate models of IPCC AR4 driven by historical natural and anthropogenic forcing agents show that most models perform well in simulating both the global and northern hemispheric mean SAT evolutions. The inclusion of natural forcing agents improves the simulation, in particular for the first half of the century. The reproducibility of the SAT averaged over China is lower than that of the global and hemispheric averages, but it is still acceptable. No model could successfully reproduce the reconstructed warming over China in the 1920s, which indicates that the mechanism responsible for the 1920s warming remains to be an open question. Numerical simulations employing AGCMs and regional climate models suggest that the negative radiation effects of sulfate aerosol overlap the effects of greenhouse gases and hence contribute to the surface cooling over eastern China during summer. However, there are no evidences supporting the idea that the anthropogenic aerosol emission dominates the recent “Southern Flooding and Northern Drought” rainfall pattern in eastern China. Observational evidences indicate a warming trend of SAT over the Tibetan Plateau starting from the middle of the 20th century. Climate model results suggest that the increase of greenhouse gases contributes to this warming trend. Multi-model ensemble scenario projections of future climate change during the 21st century indicate that the global mean SAT would continue to rise in the forthcoming century, while the intensities are scenario-dependent. The potential warming of annual mean SAT over continental China generally parallels that of the global average. The amplitudes over Northeast China, western China, and central China are stronger than that over the other regions. The warming during winter would be stronger than that during summer; the increase of daily minimum temperature would be larger than that of daily maximum temperature. Numerical model results also suggest that the global warming might have impacts on the geographic distribution of vegetations over the middle and eastern China. Analysis on the output of IPCC AR4 scenario projections shows that following the summertime warming, both the intensity and frequency of extreme precipitation and temperatures would increase over China. Multi-model inter-comparison indicates that the global warming might lead to a weakening of the thermohaline circulation; however, the change of intensity is model-dependent. Numerical model results also suggest that the global warming might not be a mechanism responsible for the recent weakening of the North Pacific shallow meridional subtropical-tropical cell observed since the late 1970s. Uncertainties in future climate change model projections are also emphasized.

**Key words** climate change, numerical simulation, attribution, scenario projection

## 1 引言

全球气候变暖已成为举世瞩目的科学问题。2007年发表的政府间气候变化委员会(IPCC)第四次报告指出,20世纪以来(1906~2005年)全球平均气温上升了 $0.74 [0.56 \sim 0.92]^\circ\text{C}$ ,近50年的线性增长趋势几乎是近100年的两倍;最近的12年中(1995~2006年)有11年位列1850年以来最暖的12个年份之中。20世纪全球海平面平均升高 $0.17 [0.12 \sim 0.22] \text{ m}$ ;在一系列温室气体排放情景下,预估的未来20年增暖为每十年 $0.2^\circ\text{C}$ ;即使所有温室气体与气溶胶的浓度在2000年的水平上保持稳定,仍旧会出现每十年 $0.1^\circ\text{C}$ 的进一步增暖<sup>[1]</sup>。该结果引起国际社会的高度关注,为了应对全球气候变化带来的挑战,国际社会在科学层面和

政治层面都采取了许多积极的举措,全球气候变化问题已经进入世界主要国家领导人的优先议事日程,成为影响国家间竞争力的重要因素。我国政府制定了《中国应对气候变化国家方案》,并进一步编制《中国应对气候变化科技专项行动》,对气候变化的成因以及未来气候变化趋势的科学预估给予高度重视。

应对气候变化需要开展气候变化检测和归因研究。地球气候有史以来就经历着冷暖交替与干湿变异的自然变化。实际气候演变过程是自然变化和人类活动影响共同作用的结果。自然变化既包括气候系统内部通过“海洋-陆地-大气-海冰”相互作用而产生的自然振荡,例如大洋热盐环流的自然振荡<sup>[2]</sup>,又包括由太阳辐射、火山气溶胶等外强迫因子变化引起的、但依然是自然因素产生的变率。人

类活动的许多方面,例如人为温室气体和气溶胶排放等,都可以影响气候。人类活动对气候变化的影响,叠加在自然气候变化的背景上。对 20 世纪气候变暖机理的准确把握,对于我们了解当今和未来的气候变化都至关重要。在气候增暖的机理研究方面,气候模式是一重要工具。利用自然和人为强迫因子驱动气候模式,并把模拟结果和观测(或重建)结果进行比较,是理解气候演变特别是近百年气候增暖的重要方法。

应对气候变化亦需要开展气候预估研究。对未来气候变化趋势的科学预估,是制定应对气候变化的有关对策的科学依据。“海-陆-气-冰”耦合的气候系统模式是目前用于气候预估研究的主要工具。IPCC 评估报告主要通过多模式的集合模拟,对未来的气候变化情景进行预估。模式模拟覆盖了一系列包括理想化排放或浓度假定的未来可能情形,包括 2000~2100 年的解释性标志情景(SRES),以及 2000 年或 2100 年后温室气体和气溶胶浓度保持稳定条件下的模式试验。较之 IPCC 第三次评估报告(TAR),最新的 IPCC 第四次评估报告(AR4)在气候变化预估评估方面的一项重要进展,是从更多的模式中得到了大量可用的数值模拟结果,这有助于减少由于模式自身的不确定性所造成的模拟误差<sup>[1]</sup>。

在气候增暖的检测、归因和预估研究方面,我国学者从观测分析到数值模拟开展了大量工作。本文的主要目的,是对中国科学院大气物理研究所近五年在上述领域的研究进展进行总结,重点是对气候变化的归因模拟和未来变化的预估模拟。

## 2 20 世纪全球和中国区域平均温度变化的模拟

### 2.1 大气环流模式模拟

20 世纪气候的数值模拟问题,既是检验气候模式性能的重要标准,又是评价模式预估未来气候变化情景可信度的基础。“气候变率与可预报性研究计划”(CLIVAR)设立了“二十世纪气候模拟国际比较计划”[C20C (Climate of the 20th Century)],分别利用大气环流模式、局部海气耦合模式、完全海气耦合模式,逐步考察模式系统对外强迫响应的变化,以期从根本上对 20 世纪气候变化进行归因<sup>[3]</sup>。C20C 组织的第一阶段模拟试验,是利用

观测海温强迫大气环流模式;第二阶段模拟试验,是在第一阶段模拟方案的基础上,进一步增加自然和人为产生的外强迫因子的作用,考察大气模式对 20 世纪气候演变的模拟能力,以作为随后与局部海气耦合模式、完全海气耦合模式进行比较的基础。图 1 给出 C20C 第二阶段模拟试验的部分模式结果,可见大部分大气模式能够模拟出 20 世纪地表气温的实际演变<sup>[4]</sup>。

Li 等<sup>[5]</sup>利用中国科学院大气物理研究所的格点大气模式 GAMIL,进行了 C20C 第二阶段的模拟试验,图 2 给出观测和模拟的纬向平均地表气温距平随时间的演变。观测资料显示,20 世纪发生了两次变暖:第一次发生在 1910~1940 年,增暖区域在北半球中高纬度,特别是 60°N 以北,增暖幅度达 1.2°C 以上;第二次发生在 1980 年代以后,增暖区域几乎覆盖全球,但是增暖幅度最强的区域仍然是北半球中高纬度。模式能够模拟出这两次变暖,只不过范围和幅度都偏小。关于第一次变暖的原因,Delworth 和 Knutson<sup>[6]</sup>认为主要是内部变率的作用,而 GAMIL 结果显示内部变率的贡献很小,主要是外强迫的影响。国外相关模式的结果亦表明,包括观测海温、太阳辐射变化和人类活动导致的温室气体变化在内的各种外强迫因子的变化,对地表气温的演变起重要作用,1930 年代和自 1970 年代开始的增暖主要是由外强迫所致<sup>[7, 8]</sup>。大气内部噪音的影响,在变冷期比变暖期要强<sup>[9]</sup>。

尽管大部分大气模式在外强迫驱动下能够较好地模拟出全球和区域的地表气温变化,但是却难以合理再现全球及区域降水变化<sup>[4]</sup>,特别是亚洲季风区的陆地降水变化<sup>[10]</sup>。在海气作用较强的热带太平洋地区,大部分模式能够模拟出南方涛动指数随时间的变化;对于非洲萨赫勒地区的降水变化,只有外强迫中包含陆面改变的模式能够模拟出其干旱化趋势;而对于北大西洋涛动(NAO)指数的变化,即使在各种外强迫共同作用下,大部分大气模式还是未能再现观测中的年际、年代际变化趋势<sup>[9, 11]</sup>。观测海温强迫能够部分再现南极涛动对 ENSO 强迫的响应,但是难以再现其长期变化趋势<sup>[12]</sup>。近期研究工作发现,在给定外强迫下,海气耦合模式亦难以再现北极涛动的长期变化<sup>[13]</sup>。

为了检验观测海温能在多大程度上解释 1880~2000 年的中国区域平均气温变化,Zhou 和 Yu<sup>[14]</sup>

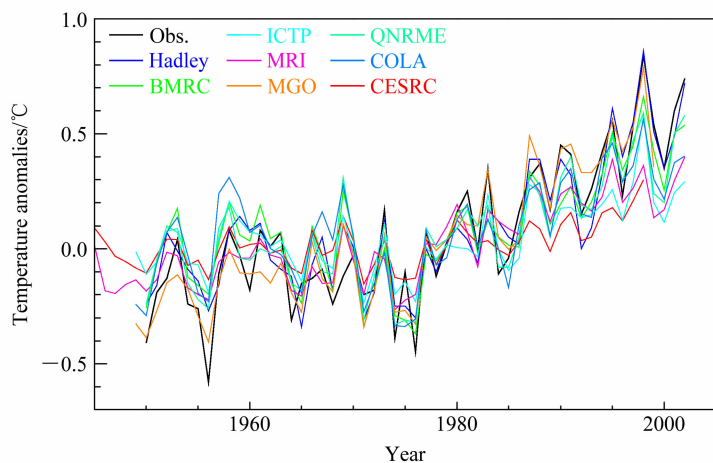


图 1 观测和模拟全球陆地 2 m 处的气温距平随时间的演变 (引自文献[4])

Fig. 1 The time evolutions of global mean surface air temperature simulated by C20C models against the observation (from reference [4])

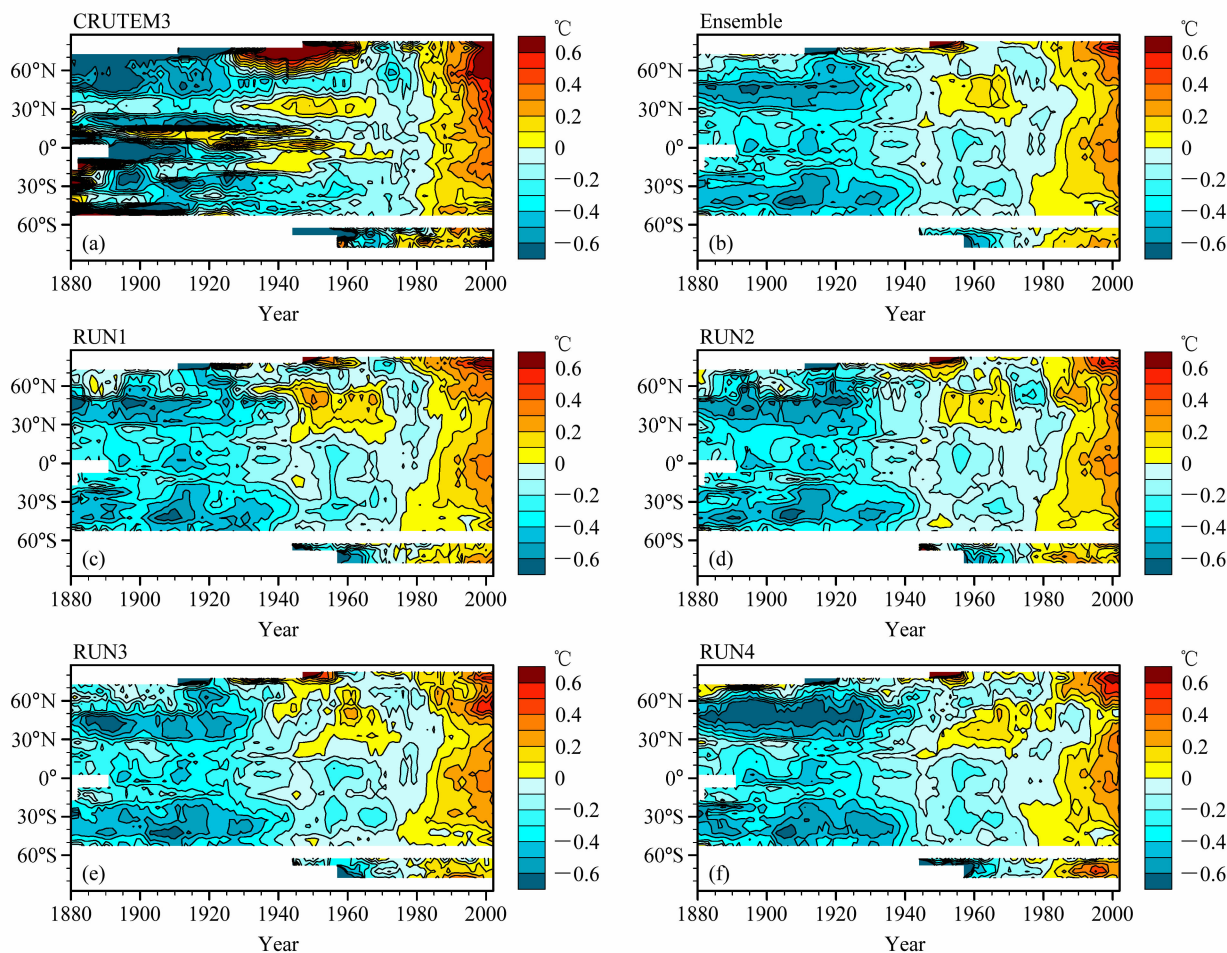


图 2 观测和模拟的纬向平均的地表气温距平: (a) 观测 CRUTEM3; (b) 四组模拟集合; (c)~(f) 四组试验。每幅图均通过 10 a 的低通滤波, 滤波后的值记在 10 a 的最后一年 (引自文献[9])

Fig. 2 The zonal mean surface air temperature from the observation and the model simulation: (a) CRUTEM3; (b) ensemble mean; (c)~(f) for each realization. Signals shorter than 10 a have been filtered away (from reference [9])

利用 HadISST 强迫 NCAR CAM2 模式, 进行了 12 个成员的集合模拟, 发现在总体特征上, 模式和观

测极为接近, 例如 20 世纪初的变冷、中期 1940 年代的变暖、1970 年代的变冷以及从 1980 年代持续



至今的变暖。集合平均和观测值的相关系数为 0.50。不过,模拟的 1880~1999 年气温变化的线性趋势只有观测值  $0.71^{\circ}\text{C}/100\text{ a}$  的一半。20 世纪上半叶中国气候变化的一个显著特征,是除了全球普遍存在的 1940 年代的暖期之外,在 1920 年代还存在一个暖期<sup>[15]</sup>,但是观测中 1920 年代的暖峰结构,在模式中没有得到再现。

## 2.2 海气耦合模式模拟

20 世纪气候模拟亦是检验海气耦合模式性能的“标准”试验之一。在该研究领域,国际上已经有大量工作,发现在考虑人为温室气体排放和硫酸盐气溶胶作用的前提下,气候系统模式能够比较成功地模拟出 20 世纪后期的全球增暖<sup>[7, 16, 17]</sup>,但如果要再现 20 世纪前期(1925~1944 年)的变暖,还需同时考虑太阳辐射和火山活动等自然外强迫因子的影响以及气候系统内部变率的作用<sup>[6, 8]</sup>。利用 LASG/IAP GOALS 模式所开展的模拟试验亦表明,20 世纪特别是 1980 年代以来的全球增暖主要来自温室气体的贡献,而硫酸盐气溶胶则部分抵消了温室气体的影响<sup>[18]</sup>。

在最近五年中,海气耦合模式的发展取得了长足进步。以参加 IPCC 试验的耦合模式数量为例,在 IPCC TAR 中,只有 16 个模式参加了比较试验,而在最近公布的第四次评估报告 IPCC AR4 中,则有 24 个耦合模式提供了试验结果。同时,这些模式无论在物理过程还是在模式分辨率上,较之 IPCC TAR 的时候都有了很大的提高<sup>[1]</sup>。Zhou 和 Yu<sup>[14]</sup>检验了参加 IPCC AR4 的 19 个耦合模式对 20 世纪全球和中国气温变化的模拟,结果如图 3 所示。就全球年平均温度在 1880~1999 年的变化而言,在自然因子和人为因子的共同强迫作用下,多数耦合模式能够成功再现全球平均气温在过去百年的实际演变,多模式集合的结果与观测序列的相关系数可以达到 0.87,这种高相关系数主要来自 20 世纪的变暖趋势,多模式集合的变暖趋势为  $0.67^{\circ}\text{C}/100\text{ a}$ ,非常接近观测的  $0.53^{\circ}\text{C}/100\text{ a}$ 。不过,模式间的离差亦很大,特别是在 20 世纪前半叶,这从图 3a 可以明显看出。方差分析表明,外强迫可以解释 20 世纪全球年平均气温变化的 60.5%,而内部变率(噪音)则解释了 39.5%,这种内部变率来自“海-陆-气-冰”耦合系统内部的相互作用;在年际变率上,耦合模式结果与实际观测

没有对应关系。进一步分析发现,耦合模式对 20 世纪后半叶温度变化的模拟效果,整体上较之 20 世纪前半叶效果要更佳,其中原因部分来自近 50 年的强迫资料更为可靠,同时温室气体的作用可能亦更为显著。

20 世纪中国气温演变的耦合模式模拟效果(图 3b),较之全球平均情况要差,但是依然可以接受,多模式集合结果与实际观测之间的相关系数为 0.55,在统计上通过了 5% 的信度检验。方差分析表明,外强迫解释了 20 世纪中国年平均温度变化的 32.5%,而内部变率(噪音)的贡献则高达 67.5%,信噪比仅为 0.69。这意味着对区域尺度的温度变化而言,强迫机制较之全球平均情况要复杂得多。另外,对于观测中的中国区域 1920 年代的变暖,耦合模式亦难以模拟出该现象。因此,无论是利用观测海温强迫 AGCM,还是采用自然外强迫因子和人为温室气体强迫耦合模式,都模拟不出这一暖期,这使得如何解释 20 世纪早期的这一变暖现象就成为一个悬而未决的问题。

## 3 近 50 年中国东部气候变化的模拟

在全球变暖的背景下,近 50 年中国东部地区的气候变化特征,可以概括地利用“暖对冷”、“旱对涝”几个字来概括。所谓“暖对冷”,即北方在变暖,而长流流域则在变冷(图 4);所谓“旱对涝”,即通常意义上所说的“南涝北旱”,长江流域降水整体偏多,而华北降水则呈干旱化趋势(图 5)。此前关于上述现象的研究,多是针对典型的季风季节-夏季的情况展开的。实际上,如图 4、5 所示,中国东部气候变化的季节特征亦很鲜明:首先,北方地区的增暖在冷季更为显著,而沿着  $30^{\circ}\text{N}$  的变冷,则在春夏两季更强;其次,“南涝北旱”型降水异常在夏季最强,冬季降水异常主要表现为华南降水偏多,而春季则表现为江南地区降水偏少。围绕着上述现象,此前已经开展了大量的分析诊断研究,揭示了其大尺度环流特征,关于这方面工作的系统总结可参阅文献<sup>[19~23]</sup>。这里着重从气候模拟的角度,关注归因研究方面的进展,特别是关于温室气体和气溶胶的贡献。

在观测海温和温室气体的共同强迫下,包括 LASG/IAP 格点大气模式<sup>[5]</sup>、NCAR CAM2<sup>[14]</sup>和国家气候中心全球大气模式 NCC T63 AGCM<sup>[24]</sup>在

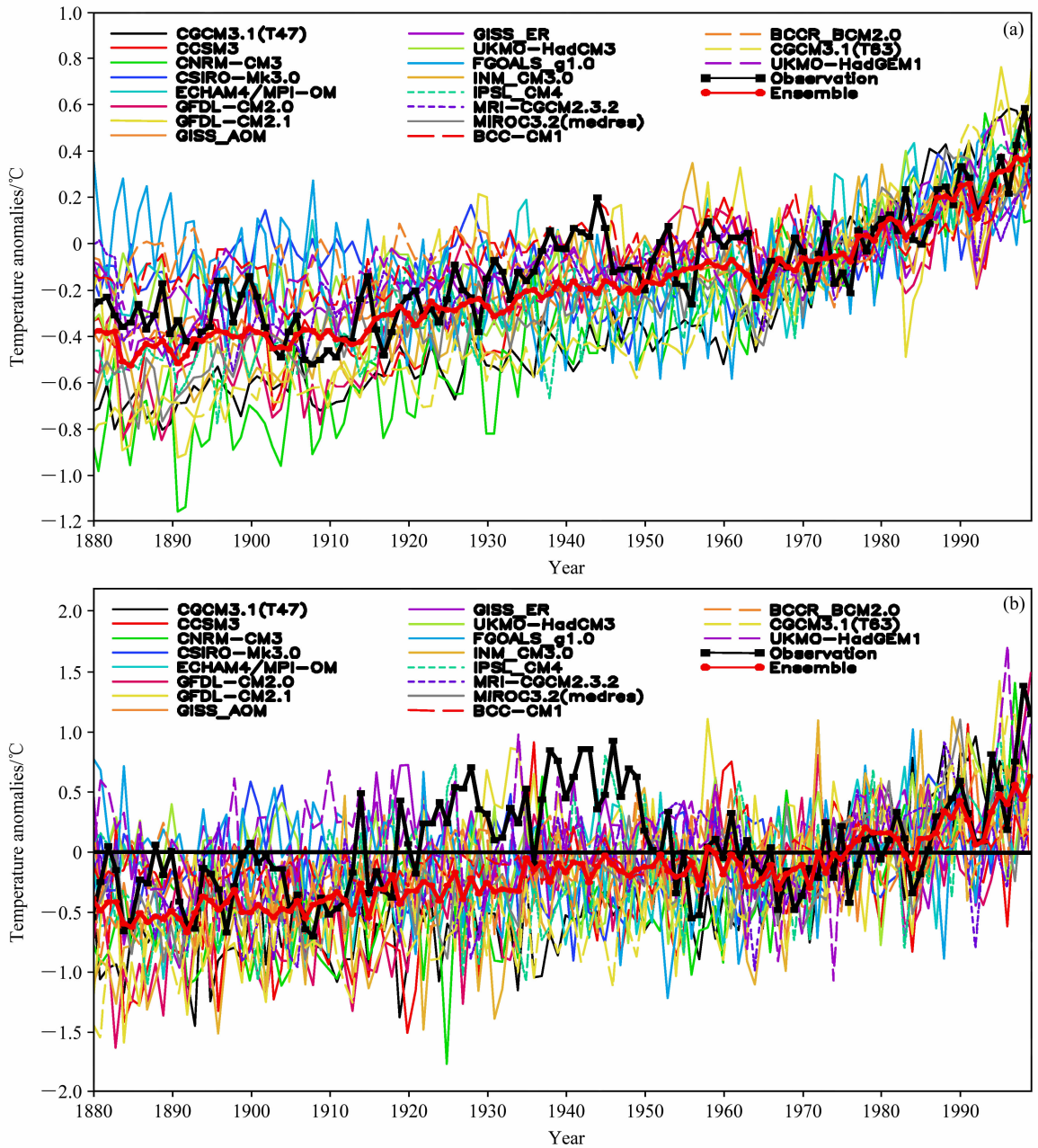


图3 观测和海气耦合模式模拟的全球 (a) 和中国区域 (b) 年平均地表气温的变化 (单位: °C)。黑色粗实线为观测结果; 红色粗实线为多模式集合的结果; 不同颜色的细线代表不同模式的结果 (引自文献[14])

Fig. 3 The global (a), and Chinese domain (b) average surface air temperature anomalies simulated by coupled models of CMIP3 20C3M (from reference [14]). Each thin color line corresponds to "run1" of each model; the observation is shown as a thick solid line; the thick red line corresponds to the multi-model ensemble mean

内的诸多大气环流模式, 都能够成功模拟出近 50 年中国年平均气温的增暖趋势, 表明自然和人为外强迫因子对中国气候的变暖具有贡献。基于海气耦合模式的研究亦支持这一结论<sup>[14]</sup>。目前, 在机理上尚不清楚的是关于中国东部地区的变冷。关于中国东部地区的春季变冷, 观测和模拟研究多认为其

与北大西洋涛动的年代际变化相联系<sup>[25~29]</sup>。而对于夏季的变冷, 则争议较多, 有观点认为其与大西洋和印度洋变暖的强迫作用有关<sup>[30~32]</sup>。与此同时, 诸多观测分析和数值模拟研究则认为大气中硫酸盐气溶胶浓度的增加亦有贡献<sup>[33~38]</sup>。模拟结果显示, 夏季在中国东部区域, 硫酸盐气溶胶的负辐射效应

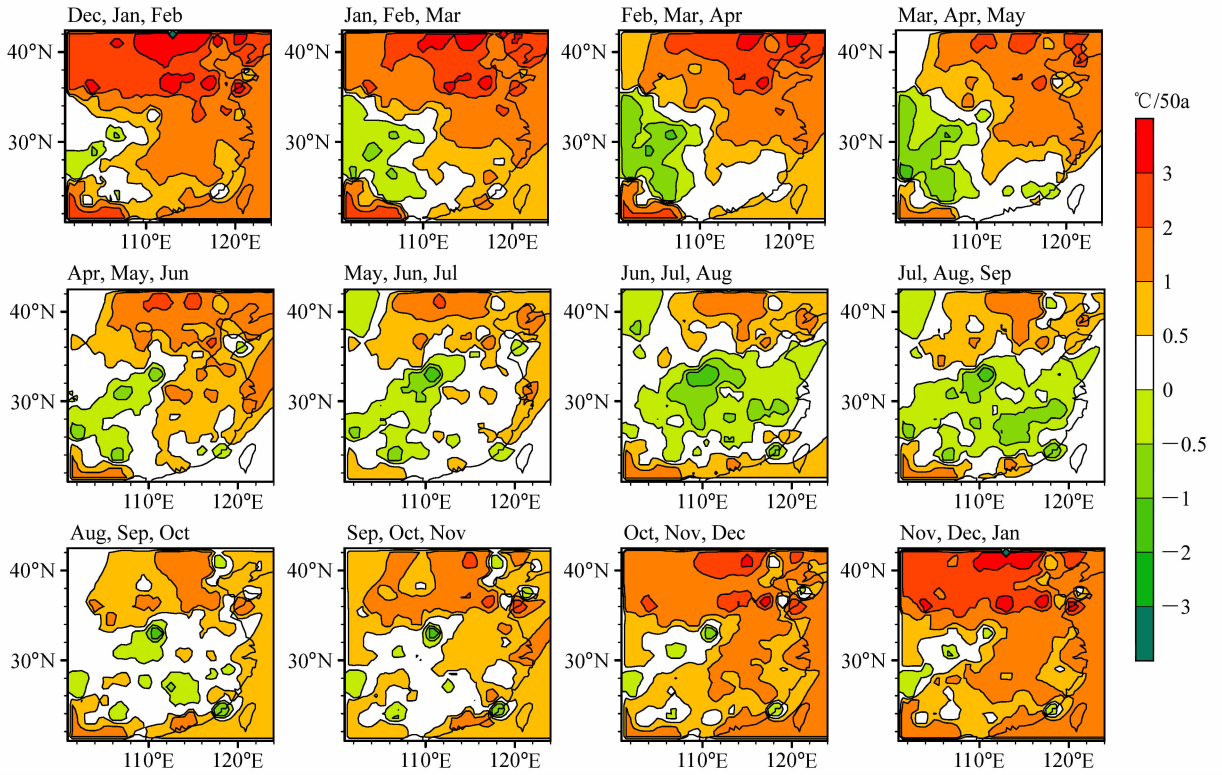


图 4 连续三个月平均的 1951~2000 年中国地表温度的变化趋势

Fig. 4 The trend of surface air temperature averaged over three months during 1951 - 2000

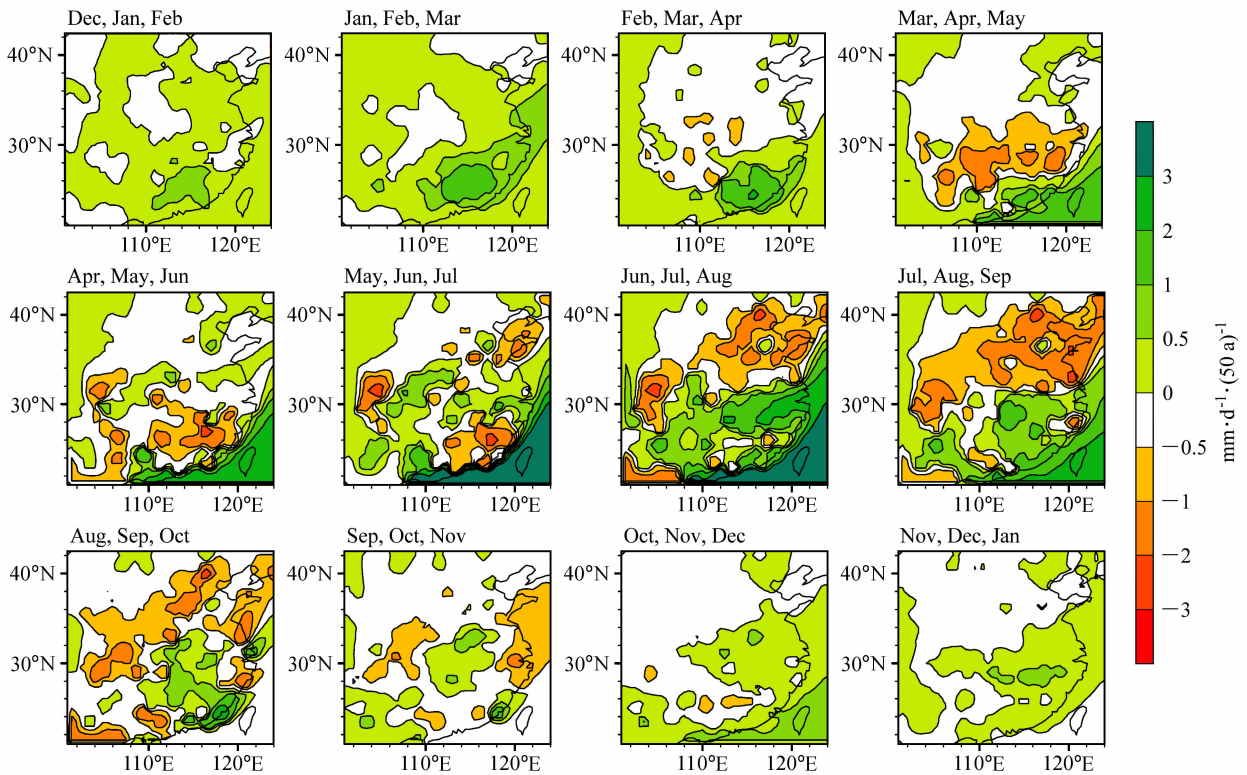


图 5 同图 4, 但为降水的变化趋势

Fig. 5 Same as Fig. 4 except for precipitation

超过了温室气体的增暖效应, 从而对温度的变冷贡献显著。与此同时, 与降水增多相关联的太阳辐射的减少, 亦是贡献因子之一。地表气温的变化除受辐射强迫直接影响外, 大尺度环流的年代际变化也可能起作用<sup>[22, 23, 26, 27]</sup>。有趣的是, 基于 AGCM 的模拟试验显示, 太阳常数的变化对该区域的变冷现象亦有贡献, 这意味着自然变率对中国东部气候的影响<sup>[9, 38]</sup>。而对于我国的“南涝北旱”现象, 尽管有数值试验结果显示黑炭气溶胶通过改变温度的垂直分布, 进而影响雨带的分布, 有助于形成“南涝北旱”型降水异常<sup>[36]</sup>, 不过, 从三维环流结构上看<sup>[22, 23]</sup>, 模式结果和观测事实相比依然存在着较大的差距。至少现有的数值模拟证据, 尚不足以支持“气溶胶浓度的增加有利于南涝北旱型降水异常形成”这一观点。

受计算机能力的限制, 基于全球大气环流模式的研究, 其模式分辨率相对较低, 难以令人满意地描述区域或者局地尺度的气候变化过程。为了弥补这方面的缺憾, 采用较高分辨率的区域气候模式是一较好选择。不过, 目前利用区域气候模式开展长时间积分的工作还不是很多, 大部分区域气候模拟研究主要关注细致的物理过程, 比如硫酸盐、黑炭、沙尘气溶胶的直接和间接辐射效应等对区域气候的影响。许多区域气候模拟结果证实, 硫酸盐气溶胶对中国东部变冷具有显著影响<sup>[19, 39~43]</sup>。

## 4 近 50 年青藏高原气候变化的模拟

青藏高原的主体大部分地面高度在海拔 4600~5100 m 之间, 达到对流层中部。其独特的地理特性, 使得青藏高原在全球变化研究中的重要意义, 被称为地球“第三极”。自 20 世纪 50 年代以来, 青藏高原地表气温表现出明显的增暖趋势。Liu 和 Chen<sup>[44]</sup>通过对青藏高原 97 个观测站资料的分析发现, 20 世纪中期以来青藏高原主体存在明显的增温趋势: 青藏高原地区全年平均地表温度增幅达到 0.16°C/10 a, 夏季 0.08°C/10 a, 冬季增暖最明显, 达到 0.32°C/10 a。Zhou 和 Zhang<sup>[45]</sup>通过探空资料发现, 从 1970 年代末高原地区温度和位势高度在平流层有变冷和减小趋势, 而在对流层出现增暖趋势, 该趋势与青藏高原上空臭氧浓度下降的趋势高度相关。Duan<sup>[46]</sup>进一步指出整个中国地区也存在类似的现象: 平流层偏冷, 对流层偏暖

的结果均与臭氧变化趋势相吻合。Chen 等<sup>[47]</sup>应用区域气候模式, 模拟出在全球二氧化碳浓度增加背景下, 青藏高原有增暖的趋势。Duan 等<sup>[48, 49]</sup>发现高原增暖伴有高原地区地表温度日变化幅度的缩小, 利用海气耦合模式的“20 世纪气候模拟”试验所进行的分析, 发现模式结果与观测基本一致, 因此, 全球温室气体浓度的增加和高原上空臭氧浓度下降对青藏高原的变暖亦有贡献。

关于青藏高原增暖对东亚地区环流和降水场的影响, 通过对长期站点资料的分析, 包庆<sup>[50]</sup>的研究表明在年代际变化时间尺度上, 青藏高原的地表增暖趋势与东亚夏季降水变化趋势显著相关; 包庆等<sup>[50, 51]</sup>根据大气环流模式敏感性试验结果指出, 青藏高原增暖后, 东亚夏季梅雨锋区降水将增加, 两侧降水则有偏弱趋势。基于 IPCC AR4 未来气候变化情景的耦合模式结果分析表明<sup>[52]</sup>, 在 A1B (温室气体中等排放量) 情景下, 青藏高原将在今后的 100 年里持续增暖, 2011~2030 年增暖 1~1.5°C, 2046~2065 年温度增加 2.5~3°C, 未来 100 年中最后 20 年 (2080~2099 年) 增暖幅度最大, 青藏高原地区增温 4°C 左右。如此强的增暖将带来多大的气候影响, 是一个值得高度关注的问题。

## 5 未来气候变化的情景模拟

### 5.1 平均态的变化

针对不同温室气体排放情景的未来气候变化预估试验, 是 IPCC 历次评估报告所重点关注的问题<sup>[17]</sup>。在 WCRP CMIP 计划为 IPCC AR4 组织的未来气候变化预估试验中, 包括 LASG/IAP 和国家气候中心的气候系统模式在内的全球总计 24 个耦合模式提供了其预估结果<sup>[53, 54]</sup>。IPCC AR4 给出的不同温室气体排放量情景下的全球温度多模式预估结果如图 6 所示, 其中 A1B 和 B1 排放情景的预估试验在 2100 年之后, 维持温室气体的浓度保持在当年水平不动, 继续积分了 200 年; 20 世纪气候模拟试验的积分在 2000 年之后, 维持温室气体浓度不动继续积分 100 年。可见, 21 世纪的全球温度变化幅度因温室气体排放情景而异, 例如在 B1 情景下 2090~2099 年较之 1980~1999 年要增暖 1.8°C, 在 A1B 情景下全球将增暖 2.8°C, 在 B2 情景下则将增暖 3.4°C。需要注意的是, 对于不同的排放情景, 即使到一定程度后温室气体浓度不再增



加(维持不变),全球平均温度亦将在未来百年继续增暖 0.5~0.6℃。如图 6 所示,在 20 世纪气候模拟中,即使温室气体和气溶胶的浓度在 20 世纪气候模拟结束后保持不变,全球平均温度在 2100 年亦将相对于 1980~1999 年继续增暖 0.6℃;对于 B1 或者 A1B 情景,即使在 21 世纪结束时温度气体浓度保持不变,全球平均温度依然将在随后的百年时间里变暖 0.6℃左右<sup>[1]</sup>。

全球增暖并非均匀分布。如图 7 所示,在不同的排放情景下,预估的 21 世纪温度变化都表现为正距平,其中北半球冬季的陆地区域和高纬度地区增温幅度最大,从沿海到内部,增暖幅度呈递减趋势。对于同纬度地区而言,干旱区的变暖幅度较之潮湿地区要强。与之相反的是,变暖幅度在南大洋和北大西洋的部分地区最小。概率密度分布函数显示,对于 2020~2029 年间的变暖,模式间的一致性较好(PDF 宽度窄),而对于 2090~2099 年间的变暖,模式间的一致性则较之短期增暖要差(PDF 宽度大)。此外,不同情景下的变暖特征在 2020~2029 年间较为相似,但是到了 2090~2099 年间则区别明显,这是由于此时不同情景下的温室气体浓度的巨大差异造成的。此外,预估的大气纬向平均温度的垂直分布在热带对流层的上层最暖,而在平流层则变冷<sup>[1]</sup>。

此外,关于 21 世纪的降水变化,以 A1B 排放情景为例,IPCC AR4 多模式集合的模拟结果显示,在北美和欧洲大陆,副极地地区降水增多,而副热带地区降水则减少;但是副热带地区的变干在亚洲地区则不明显。对于南亚和东南亚夏季风区,模式结果预估未来降水将增加<sup>[55]</sup>。

除了不同排放情景的预估之外,另外一种常用的数值试验,是考察 CO<sub>2</sub> 浓度加倍的气候响应。我们利用 LASG/IAP FGOALS\_s 模式<sup>[78, 79]</sup>,令大气模式中 CO<sub>2</sub> 浓度从初始值  $345 \times 10^{-6}$  起,每个模式年增加 1%,经过约 70 年积分,CO<sub>2</sub> 浓度到达加倍水平  $690 \times 10^{-6}$ ,然后,固定  $690 \times 10^{-6}$  浓度值继续强迫模式积分 5 年。模式的响应如图 8a 所示。伴随全球温室气体浓度的升高,全球平均温度和降水均逐步增加。CO<sub>2</sub> 浓度增加所导致的年平均温度和降水变化如图 8b、c 所示,全球均呈现增暖的特征,但是在北大西洋区域则呈现显著的变冷特征,这是由于大洋热盐环流的减弱引起的。尽管就

全球平均来说,降水是增加的,但是其水平分布却并不均匀,部分地区特别是北印度洋、中太平洋和中美洲海洋区域降水则减少。有趣的是中国东部地区的降水变化呈现出“南涝北旱”的特征,而这一特征在 A1B 的多模式集合结果中则不明显<sup>[55]</sup>。

## 5.2 东亚季风区的变化

姜大膀等<sup>[56]</sup>利用国际上七个气候模式,分析了 A2 和 B2 排放情景下,中国气候 21 世纪的变化趋势,指出中国大陆年均表面气温升高过程与全球同步,但增幅在东北、西部和华中地区较大,且表现出明显的年际变化;在 21 世纪前 50 年,温室气体含量的增加除在一定程度上会增加青藏高原大部分夏季降水量外,不会对中国大陆其余地区的年、季节平均降水量产生较大影响。他们进一步分析了 A2 排放情景下,中国大陆 21 世纪前 30 年的十年际变化趋势<sup>[57]</sup>,研究揭示:大陆冬季和夏季表面温度、表面最高温度和最低温度分别升高 0.3~2.3℃、0.1~2.0℃、0.5~2.7℃,增幅大体上呈现东西向带状分布,由南至北升温逐渐加强。此外,上述三气候要素冬季升温幅度要大于同期夏季、表面最低温度升幅要强于同期表面最高温度,冬季和夏季表面温度的季节内变化范围减小。Jiang 等<sup>[58]</sup>基于六套全球海气耦合气候模式的数值模拟结果,指出 20 世纪后期东亚夏季风的年代际减弱(对应降水的“南涝北旱”现象),与同期人类活动引发的全球变暖之间没有明显的联系。模式结果还显示,如果 21 世纪温室效应在 20 世纪后期的基础上进一步加剧,东亚夏季风系统可能会受此影响而趋于增强。

此外, Jiang<sup>[59]</sup>基于 IPCC A2 和 B2 排放情景的多模式集合预估结果,使用 BIOME3 生态模式,模拟了中国大陆潜在植被的变化趋势,结果表明在全球持续变暖和大气 CO<sub>2</sub> 浓度持续增加背景下,21 世纪 50 年代中国中东部潜在植被的地理分布带整体上大规模向北迁移,西部地区变化范围相对较小;21 世纪 90 年代潜在植被的变化范围显著大于 21 世纪 50 年代,特别是在西部地区。此外,由于不同的气候模式预估的气候情景不同,相应的潜在植被变化也有所不同;在 21 世纪 90 年代 SRES A2 情景下潜在植被的变化中,35°N 以南主要源于地表气温变化,其北部则可归因于地表温度、降水和大气 CO<sub>2</sub> 浓度的共同变化。此外,模式敏感性的

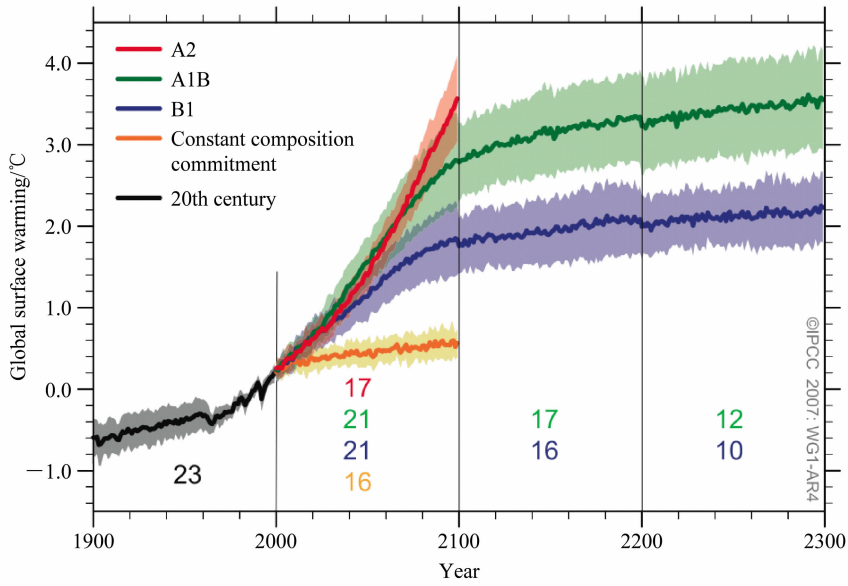


图6 IPCC AR4 多模式集合预估的 21 世纪全球表面气温相对于 1980~1999 年平均值的变化(同时给出 20 世纪气候模拟的结果)。粗线:多模式集合的结果;阴影:±1 个标准偏差的范围;数字:用于不同排放情景预估的模式数目(引自文献[55], IPCC AR4 的图 10.4)  
Fig. 6 Multi-model means of surface warming (compared to the 1980-1999 base period) for the SRES scenarios A2, A1B and B1, shown as continuations of the 20th-century simulation (from reference [55], Fig. 10.4 of IPCC AR4). Lines show the multi-model means, shading denotes the ±1 standard deviation range

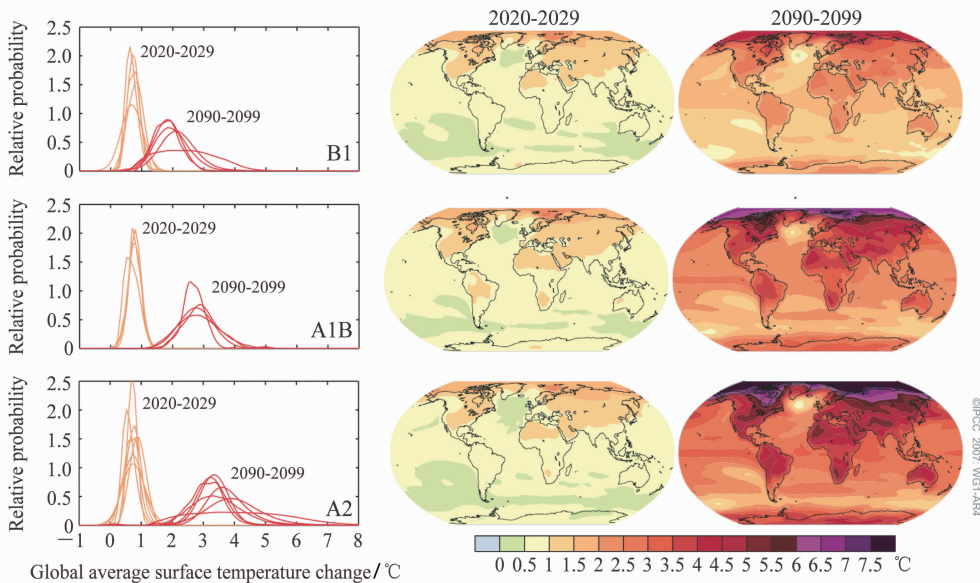


图7 IPCC AR4 多模式集合预估的 21 世纪早期和晚期的全球表面气温相对于 1980~1999 年平均值的变化(引自文献[55], IPCC AR4 的图 10.8 和图 10.28, 或者 AR4 Technical Summary 的图 28)。中间和右边两栏是多模式集合的温度变化预估结果, 分别对应 B1(上), A1B(中)和 A2(下)三种排放情景下的 2020~2029 年(中间)和 2090~2099 年(右栏)的模拟结果; 左栏是模拟的全球平均温度变化的概率分布密度函数(PDF), 反映模拟结果的不确定性

Fig. 7 Projected surface temperature changes for the early and late 21st century relative to the period 1980 to 1999 (from reference [55], Fig. 10.8 and 10.28 of IPCC AR4, see also Fig. TS. 28 of Technical Summary of IPCC AR4). The central and right panels show the AOGCM multi-model average projections for the B1 (top), A1B (middle) and A2 (bottom) SRES scenarios averaged over the decades 2020 to 2029 (centre) and 2090 to 2099 (right). The left panel shows corresponding uncertainties as the relative probabilities of estimated global average warming from different models for the same periods



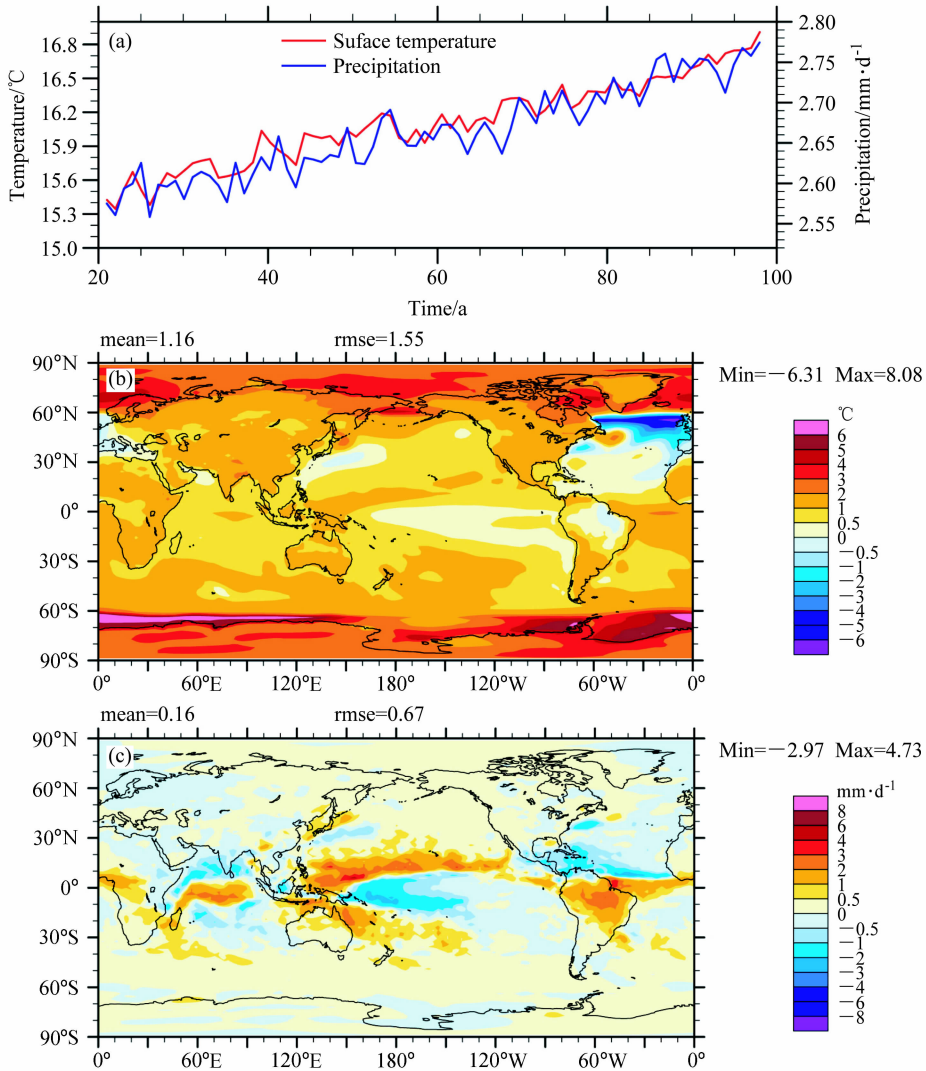


图 8 FGOALS-s 的  $\text{CO}_2$  加倍试验结果: (a) 年平均全球表面气温和降水的变化; 模式积分最后 10 年与最初 10 年的 (b) 表面气温之差以及 (c) 降水之差

Fig. 8 The results of  $2\times\text{CO}_2$  experiment simulated by using FGOALS\_s model; (a) Global annual mean surface air temperature and precipitation. The differences of (b) surface air temperature and (c) precipitation between the first and last ten-years averages during the 70 years simulation

不同,可能会直接影响到不同模式结果间的差别,例如,张文君等<sup>[60, 61]</sup>基于观测数据,综合评估了 IPCC AR4 耦合模式对中国区域土壤湿度的模拟能力,指出当前耦合模式在季风降水模拟上的偏差,直接影响到对陆面过程因子(例如土壤湿度)的模拟结果。

### 5.3 极端气候的变化

极端气候事件对社会生产的影响更为显著。围绕着观测事实的分析,此前已经有大量的工作<sup>[62~64]</sup>。全球变暖背景下的极端气候指标变化是众所关注的问题。大量基于模式的结果均表明,在未来更暖气

候情景下,全球极端温度和降水事件将增多和加剧<sup>[65]</sup>。但是,这些结果不具有空间一致性,不同区域有不同的过程起主导作用<sup>[66]</sup>。基于区域气候模式的模拟结果表明,当  $\text{CO}_2$  加倍后,中国区域温度将升高,日最低温度增加大于日最高温度的增加,未来中国地区温度日较差减小;降水将增多,极端事件也将增多<sup>[67~70]</sup>。研究表明,区域气候模式的结果受到分辨率和地形的显著影响<sup>[69]</sup>。

上述工作多是基于单一模式的结果。为了克服结果的模式依赖性,李红梅<sup>[71]</sup>利用 WCRP CMIP 为 IPCC AR4 组织的  $\text{CO}_2$  加倍试验,分析了 15 个

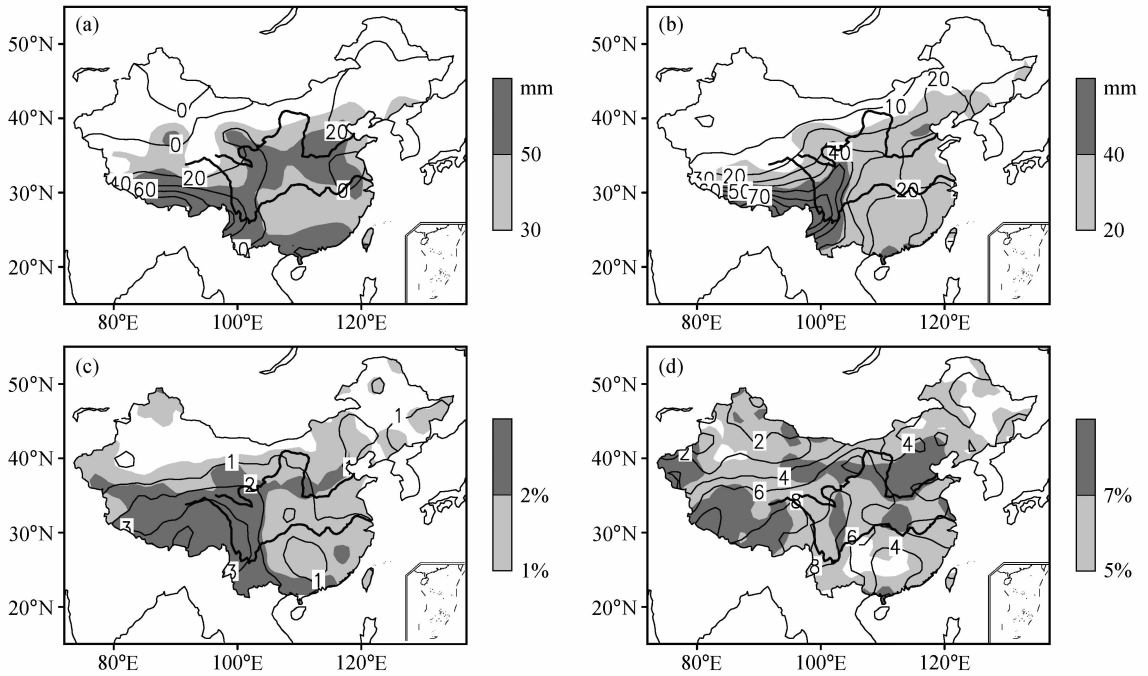


图9 多模式集合平均盛夏各降水特性指标变化(等值线)和相应的模式结果离差(阴影)(引自文献[71]): (a)总降水量; (b)极端降水量; (c)极端降水频率; (d)极端降水量占总降水量百分比  
Fig.9 Multi-model ensemble mean of Jul - Aug precipitation change (isolines) and the spread among the models (shading) in  $2\times\text{CO}_2$  experiments of IPCC AR4 (from reference [71]): (a) Total rainfall amount (mm); (b) extreme precipitation amount (mm); (c) extreme precipitation frequency (%); (d) percentage contribution of extreme precipitation to total rainfall amount (%)

耦合模式模拟的中国区域的极端温度指标变化。图9给出多模式集合平均的结果以及不同模式间的离差分布。在 $\text{CO}_2$ 加倍试验中,模式 $\text{CO}_2$ 浓度在工业革命前水平基础上每年递增1%,到大约第70年达到加倍水平,随后固定 $\text{CO}_2$ 浓度值继续积分150年,这里取最后20年的结果用于分析。注意这里的“变化”是指 $\text{CO}_2$ 加倍试验最后20年气候平均值与对应的控制试验(即大气 $\text{CO}_2$ 浓度维持在工业革命前的水平不动)的20年气候平均值之差。集合平均结果表明在未来 $\text{CO}_2$ 加倍情景下,除西北和中国东部小块区域外,全国大部分地区夏季总降水量将增加,其中以青藏高原和东北地区为增加大值区。模式模拟的各极端降水指标变化分布型式与总降水量变化较一致,均表现为增大,但西北地区的减小区域比总降水量小得多,极端降水主要表现为全国一致的增加,也以青藏高原地区的增加值最大。模式模拟的总降水量和极端降水指标离差大值区位于青藏高原地区。

对于极端温度的变化,如图10所示,模式集合平均结果表明 $\text{CO}_2$ 加倍后,寒夜和寒昼发生天

数将减少,比较而言,基于日最低温度统计得到的寒夜比基于日最高温度统计得到的寒昼减少幅度大;而暖夜和暖昼发生天数将增加,且由北向南呈递增分布。同样,基于日最低温度统计得到的暖夜,比基于日最高温度统计得到的暖昼的增加幅度要大。这反映日最低温度的增大幅度比日最高温度大。模式间离差大值区位于青藏高原地区。

### 5.4 海洋环流的变化

关于全球变暖对海洋环流的影响,国际学术界关注的重点是大洋热盐环流的变化,这主要是由于热盐环流经向热输送对全球气候的影响<sup>[72, 73]</sup>。有研究证据显示,与热盐环流减弱相关联的大西洋海温异常,是导致欧亚大陆(含中国)气候异常的重要因子<sup>[74]</sup>。IPCC AR4的多模式情景预估结果表明,21世纪大西洋经向翻转环流将很可能减缓,在SRES A1B排放情景下,到2100年降低25%,但在21世纪期间,经向翻转环流很可能不会出现明显的突变,经向翻转环流的更长期的变化尚无法进行可靠的评估<sup>[1, 55]</sup>。海气耦合模式模拟的热盐环流对温室气体增加的响应强弱,具体因模式而异。利

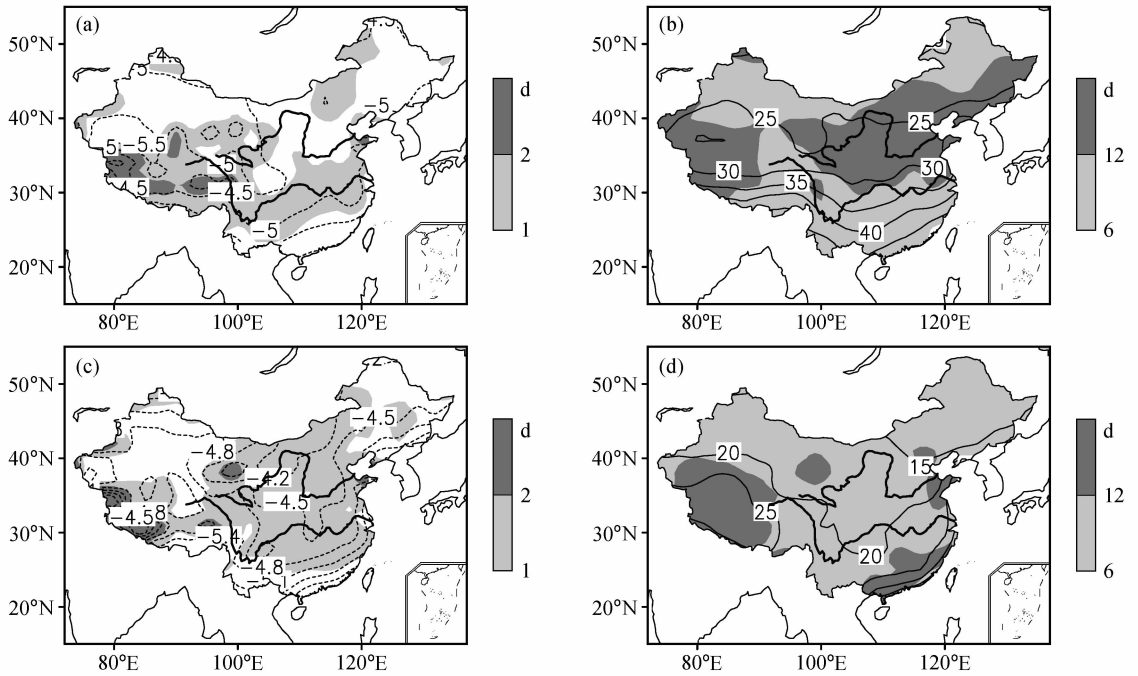


图 10 多模式集合平均极端温度发生天数变化(等值线)和相应的各模式结果离差(阴影)(引自文献[71]): (a) 寒夜; (b) 暖夜; (c) 寒昼; (d) 暖昼

Fig. 10 Multi-model ensemble mean of Jul-Aug extreme temperature change (isolines) and the spread among the models (shading) in  $2\times$   $\text{CO}_2$  experiments of IPCC AR4 (from reference [71]): (a) Cold nights; (b) warm nights; (c) cold days; (d) warm days

用 IAP/LASG 气候系统模式 GOALS 所进行的模拟研究表明,全球增暖令北大西洋高纬热盐环流的下沉区海温升高、海水变淡,海水密度随之降低,海水下沉减弱,其与低纬大洋间的经向密度梯度减少。当大气中  $\text{CO}_2$  浓度加倍时,热盐环流减弱 8%。这种变化主要限于北大西洋而非整个输送带的均匀一致减弱,它带来大西洋中高纬度极向热输送减弱最多达 10%<sup>[75]</sup>。

北太平洋副热带-热带经圈环流 (STC) 对全球增暖的敏感性,是气候变暖研究中关注的另一海洋问题。STC 通过向赤道输送冷的次表层水,对赤道地区的热量平衡具有重要影响。观测研究发现,太平洋 STC 的变弱可能是导致过去几十年来赤道太平洋变暖的根本原因。观测证据表明,太平洋 STC 自 20 世纪 70 年代开始变弱,导致赤道冷水上翻减弱约 25%,令表层海温升高约  $0.8^\circ\text{C}$ ; 由于 STC 减弱而导致的赤道增暖,可能是引起 20 世纪 70 年代中期以来 El Niño 事件强度大、持续时间长、频率增加的原因之一<sup>[76]</sup>。围绕着 STC 变化的原因,前期研究推测有两种可能机制:全球变暖和自然变率

的影响。周天军等<sup>[77]</sup>利用 LASG/IAP 海气耦合模式,讨论了  $\text{CO}_2$  加倍导致的全球变暖对北太平洋 STC 的影响,结果发现由于全球变暖的信号主要位于中高纬度,热带中低纬度大气的变化相对不大,由此导致 STC 的响应很弱,只有  $0.2\sim 0.3$  Sv/K,位于海气耦合系统自然变率的范畴之内。因此,全球增暖可能不是导致太平洋 STC 自 20 世纪 70 年代以来持续变弱的原因。

## 6 总结

(1) 利用实际观测海温驱动大气环流模式,能够较好地模拟 20 世纪全球平均地表气温的变化,包括 20 世纪初的变冷、1940 年代的变暖、1970 年代的变冷、以及从 1980 年代持续至今的变暖。但模拟的 20 世纪增暖趋势较之观测偏弱。基于 CLIVAR C20C 的模拟试验表明,包括海温、太阳入射自然变化和人类活动导致的温室气体在内的各种外强迫因子变化,对全球地表气温变化具有重要作用。大气内部噪音的影响在变冷期比变暖期要强。利用给定外强迫,难以模拟再现包括北大西洋涛动

/北极涛动和南极涛动在内的高纬度环流的长期变化趋势。

(2) 利用温室气体和硫酸盐气溶胶等“历史资料”驱动气候系统模式, 能够较好地模拟出 20 世纪后期的全球增暖, 但如果要再现 20 世纪前期(1940 年代)的变暖, 还需同时考虑太阳辐射等自然外强迫因子。就全球年平均温度在 1880~1999 年的变化而言, 在自然因子和人为因子的共同强迫作用下, IPCC AR4 耦合模式能够成功再现全球平均气温在过去百年的实际演变, 多模式集合的结果与观测序列的相关系数为 0.87, 这种高相关系数主要来自 20 世纪的变暖趋势, 多模式集合的变暖趋势为  $0.67^{\circ}\text{C}/100\text{a}$ , 非常接近观测的  $0.53^{\circ}\text{C}/100\text{a}$ 。20 世纪中国气温演变的耦合模式模拟技巧, 较之全球平均情况要低, 多模式集合结果与实际观测之间的相关系数为 0.55。无论利用观测海温强迫 AGCM, 还是采用自然外因子和温室气体强迫耦合模式, 都模拟不出重建资料中中国气候在 1920 年代的变暖。

(3) 近 50 年中国东部地区的气候变化, 主要表现为北方增暖, 长河流域变冷, 长江流域降水偏多, 华北降水则减少。尽管 AGCM 和耦合模式试验都表明自然和人为外强迫因子对中国气候的变暖具有贡献, 但要准确模拟长江流域的夏季变冷则有困难。基于大气环流模式、特别是区域气候模式的模拟试验表明, 夏季在中国东部区域, 硫酸盐气溶胶的负辐射效应超过了温室气体的增暖效应, 从而对温度的变冷有显著贡献。但是, 现有的数值模拟证据不足以说明气溶胶增加对“南涝北旱”型降水异常有贡献。

(4) 观测资料分析发现, 20 世纪中期以来青藏高原主体存在明显的增温趋势, 高原增暖与高原上空臭氧浓度下降紧密联系; 基于区域气候模式和海气耦合模式试验结果的分析表明, 全球温室气体浓度的增加对青藏高原的变暖有显著贡献。大气环流模式敏感性试验结果指出, 青藏高原增暖有可能对东亚夏季梅雨锋降水产生影响。未来气候变化的情景预估结果表明青藏高原将在 21 世纪继续增暖。

(5) 基于 IPCC AR4 的多模式集合未来气候预估结果表明, 21 世纪全球平均温度将继续增暖, 增温幅度因不同排放情景而异, 例如在 B1 情景下 2090~2099 年较之 1980~1999 年要增暖  $1.8^{\circ}\text{C}$ ,

在 A1B 情景下全球将增暖  $2.8^{\circ}\text{C}$ , 在 B2 情景下则将增暖  $3.4^{\circ}\text{C}$ 。21 世纪的中国气候变化趋势, 大陆年均表面气温的升高过程与全球同步, 但增幅在东北、西部和华中地区较大, 且表现出明显的年际变化; 冬季升温幅度要大于同期夏季、表面最低温度升幅要强于同期表面最高温度。数值试验结果表明, 全球增暖有可能对中国中东部植被的地理分布产生影响。

(6) 多模式集合平均结果反映,  $\text{CO}_2$  加倍后中国夏季温度将升高, 极端温度事件增多; 在将来更暖的气候背景下, 中国大部分地区总降水将增多, 全国极端降水强度加大且更频繁发生, 极端降水占总降水的比例也将增大。基于 IPCC AR4 的多模式结果比较表明, 模式结果间离差的大值区主要位于青藏高原。

(7) 全球增暖有可能令大洋热盐环流减弱, 但是减弱的幅度因模式而异。在  $\text{CO}_2$  加倍的情况下, LASG/IAP GOALS 模式的热盐环流减弱 8%, 但这种变化主要限于北大西洋而非整个输送带的均匀一致减弱, 它带来大西洋中高纬度极向热输送减弱最多达 10%。数值试验结果表明, 全球增暖可能不是导致北太平洋副热带-热带经圈环流自 20 世纪 70 年代以来持续变弱的原因。

最后应该指出的是, 制定应对气候变化的有关对策, 需要利用气候模式来开展未来气候变化的预估研究, 但是, 目前的气候模式远非尽善尽美, 对 20 世纪气候演变的模拟能力尚存在诸多不足, 这直接影响到未来预估结果的可信性; 模式物理过程还存在诸多需要改进之处, 例如云-辐射过程是目前气候模式中不确定性最大的部分, 而与该过程相联系的反馈过程, 直接影响到气候模式预估结果的准确性。与此同时, 目前的气候模式预估工作, 主要建立在“海-陆-气-冰”耦合的气候系统模式基础上, 没有考虑陆地和海洋碳循环过程, 这给模式预估结果带来的不确定性亦需要高度关注。

## 参考文献 (References)

- [1] IPCC. *Climate Change 2007: The Physical Science Basis*. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Solomon S, Qin D, Manning M, et al., Eds. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 2007

- [2] 周天军, 张学洪, 王绍武. 大洋温盐环流与气候变率的关系研究. *科学通报*, 2000, **45** (4): 421~425
- [3] Folland C K, Shukla J, Kinter J, et al. C20C: The climate of the twentieth century project. *CLIVAR Exchanges*, 2002, **7** (2): 37~39
- [4] Kinter J, Folland C, Kirtman B P. Workshop on Climate of the 20th Century and Seasonal to Interannual Climate Prediction. 2005, ftp: //www.iges.org/pub/kinter/c20c/jul2005/C20C\_Wkshp\_Jul05\_rep.pdf
- [5] 李立娟, 王斌, 周天军. 外强迫因子对二十世纪全球变暖的综合影响. *科学通报*, 2007, **52** (15): 1820~1825  
Li L J, Wang B, Zhou T J. Impact of external forcing agents on the 20th century global warming. *Chinese Science Bulletin*, 2007, **52**: 3148~3154
- [6] Delworth T L, Knutson T R. Simulation of early 20th century global warming. *Science*, 2000, **287**: 2246~2250
- [7] Tett S F B, Stott P A, Allen M A, et al. Causes of twentieth century temperature change. *Nature*, 1999, **399**: 569~572
- [8] Stott P A, Tett S F B, Jones G S, et al. External control of 20th century temperature by natural and anthropogenic forcing. *Science*, 2000, **290**: 2133~2137
- [9] 李立娟. 格点大气环流模式(GAMIL)对流、云-辐射方案的改进与数值模拟. 中国科学院大气物理研究所博士学位论文, 2007. 70~73
- [10] Zhou Tianjun, Yu R, Li H, et al. Ocean forcing to changes in global monsoon precipitation over the recent half century. *J. Climate*, 2008 (accepted and in press)
- [11] Scaife A A, Kucharski F, Folland C K, et al. The CLIVAR C20C Project: Selected 20th century climate events. *Climate Dyn.*, 2008 (submitted)
- [12] Zhou Tianjun, Yu Rucong. Sea-surface temperature induced variability of the Southern Annular Mode in an atmospheric general circulation model. *Geophys. Res. Lett.*, 2004, **31**, L24206, doi: 10.1029/2004GL021473
- [13] 辛晓歌, 周天军, 宇如聪. 气候系统模式对北极涛动的模拟. *地球物理学报*, 2008, **51** (2): 45~59
- [14] Zhou T J, Yu R C. Twentieth century surface air temperature over China and the globe simulated by coupled climate models. *J. Climate*, 2006, **19** (22): 5843~5858
- [15] Wang S W, Gong D. Enhancement of the warming trend in China. *Geophys. Res. Lett.*, 2000, **27** (16): 2581~2584
- [16] Stouffer R J, Manabe S, Vinnikov K Y. Model assessment of the role of natural variability in recent global warming. *Nature*, 1994, **367**: 634~636
- [17] 周天军, 赵宗慈. 20 世纪中国气候变暖的归因分析. *气候变化研究进展*, 2006, **2** (1): 28~31
- [18] Ma X Y, Guo Y, Shi G, et al. Numerical simulation of global temperature change over the 20th century with IAP/LASG GOALS model. *Adv. Atmos. Sci.*, 2004, **21**: 234~242
- [19] 陈隆勋, 周秀骥, 李维亮, 等. 中国近 80 年来气候变化特征及其形成机制. *气象学报*, 2004, **62** (5): 634~646
- [20] Huang R, Chen J, Huang G. Characteristics and variations of the East Asian monsoon system and its impacts on climate disasters in China. *Adv. Atmos. Sci.*, 2007, **24** (6): 993~1023
- [21] Wang H, Han J, Zhang Q, et al. Brief review of some CLIVAR-related studies in China. *Adv. Atmos. Sci.*, 2007, **24** (6): 1037~1048
- [22] Yu R C, Zhou T J. Seasonality and three-dimensional structure of the interdecadal change in East Asian monsoon. *J. Climate*, 2007, **20**: 5344~5355
- [23] 宇如聪, 周天军, 李建, 等. 中国东部气候年代际变化三维特征的研究进展. *大气科学*, 2008, **32** (4): 893~905
- [24] 徐影, 罗勇, 赵宗慈, 等. BCC-AGCM1.0 模式对 20 世纪气候变化的检测. *气候变化特别评估报告*, 2005, **6**: 1~6
- [25] Nitta T, Hu Z Z. Summer climate variability in China and its association with 500 hPa height and tropical convection. *J. Meteor. Soc. Japan*, 1996, **74**: 425~445
- [26] Yu R, Zhou T. Impacts of winter-NAO on March cooling trends over subtropical Eurasia continent in the recent half century. *Geophys. Res. Lett.*, 2004, **31**, L12204, doi: 10.1029/2004GL019814
- [27] Li J, Yu R C, Zhou T J, et al. Why is there an early spring cooling shift downstream of the Tibetan Plateau. *J. Climate*, 2005, **18** (22): 4660~4668
- [28] Xin X G, Yu R C, Zhou T J, et al. Drought in late spring of South China in recent decades. *J. Climate*, 2006, **19** (13): 3197~3206
- [29] Xin X G, Li Z, Yu R, et al. Impacts of the upper tropospheric cooling upon the late spring drought in East Asia simulated by a regional climate model. *Adv. Atmos. Sci.*, 2008 (accepted and in press)
- [30] Gong D Y, Ho C H. Shift in the summer rainfall over the Yangtze River valley in the late 1970s. *Geophys. Res. Lett.*, 2002, **29** (10), 1436, doi: 10.1029/2001GL014523
- [31] Hu Z, Yang S, Wu R. Long-term climate variations in China and global warming signals. *J. Geophys. Res.*, 2003, **108** (D19), 4614, doi: 10.1029/2003JD003651
- [32] 周连童, 黄荣辉. 关于我国夏季气候年代际变化特征及其可能成因的研究. *气候与环境研究*, 2003, **8** (3): 274~290
- [33] 周秀骥, 李维亮, 罗云峰. 中国地区大气气溶胶辐射强迫及区域气候效应的数值模拟. *大气科学*, 1998, **22** (4): 418~427
- [34] Xu Q. Abrupt change of the mid-summer climate in central East China by the influence of atmospheric pollution. *Atmos. Environ.*, 2001, **35**: 5029~5040
- [35] 张立盛, 石广玉. 硫酸盐和烟尘气溶胶辐射特性及辐射强迫的模拟估算. *大气科学*, 2001, **25** (2): 231~242
- [36] Menon S, Hansen J, Najarenko L, et al. Climate effects of black carbon aerosols in China and India. *Science*, 2002,

- 297**: 2250~2252
- [37] 马晓燕, 石广玉, 郭裕富, 等. 温室气体和硫酸盐气溶胶的辐射强迫作用. *气象学报*, 2005, **63**: 41~48
- [38] Li L, Wang B, Zhou T. Contributions of natural and anthropogenic forcings to the summer cooling over eastern China: An AGCM study. *Geophys. Res. Lett.*, 2007, **34**, L18807, doi: 10.1029/2007GL030541
- [39] Li X, Zhou X, Li W, et al. The cooling of Sichuan Province in recent 40 years and its probable mechanisms. *Acta Meteor. Sinica*, 1995, **9**: 57~68
- [40] Qian, Y, Giorgi F. Interactive coupling of regional climate and sulfate aerosol models over eastern Asia. *J. Geophys. Res.*, 1999, **104**: 6477~6499
- [41] 王喜红, 石广玉, 马晓燕. 东亚地区对流层人为硫酸盐辐射强迫及其温度响应. *大气科学*, 2002, **26**: 751~760
- [42] 吴润, 蒋维楣, 刘红年, 等. 硫酸盐气溶直接和间接辐射效应的模拟研究. *环境科学学报*, 2002, **22** (2): 129~134
- [43] Huang Y, Chameides W L, Dickinson R E. Direct and indirect effects of anthropogenic aerosols on regional precipitation over East Asia. *J. Geophys. Res.*, 2007, **112**: Do3212, doi: 10.1029/2006JD007114
- [44] Liu X D, Chen B D. Climatic warming in the Tibetan Plateau during recent decades. *Int. J. Climatol.*, 2000, **20** (14): 1729~1742
- [45] Zhou S W, Zhang R H. Decadal variations of temperature and geopotential height over the Tibetan Plateau and their relations with Tibet ozone depletion. *Geophys. Res. Lett.*, 2005, **32** (18): 18705~18705
- [46] Duan A M. Cooling trend in the upper troposphere and lower stratosphere over China. *Geophys. Res. Lett.*, 2007, **34**: L15708, doi: 10.1029/2007GL029667
- [47] Chen B, Chao W C, Liu X. Enhanced climatic warming in the Tibetan Plateau due to double CO<sub>2</sub>: A model study. *Climate Dynamics*, 2003, **20**: 401~413
- [48] Duan A M, Wu G X. Change of cloud amount and the climate warming on the Tibetan Plateau. *Geophys. Res. Lett.*, 2006, **33**, L22704, doi: 10.1029/2006GL027946
- [49] Duan Anmin, Wu Guoxiong, Zhang Qiong, et al. New proofs of the recent climate warming over the Tibetan Plateau as a result of the increasing greenhouse gases emissions. *Chinese Science Bulletin*, 2006, **51** (11): 1396~1400
- [50] 包庆. 青藏高原气候动力学的数值模拟研究. 中国科学院研究生院博士学位论文, 2007. 149pp
- [51] 包庆, Wang Bin, 吴国雄, 等. 青藏高原增暖对东亚夏季风的影响——大气环流模式数值模拟研究. *大气科学*, 2008, **32** (5), in press
- [52] Meehl G A, Stocker T F, Collins W D, et al. Global climate projections. In: *Climate Change 2007: The Physical Science Basis*, the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, Solomon, S. et al., Eds. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 2007
- [53] Ding Y, Ren G, Zhao Z, et al. Detection, causes and projection of climate change over China: An overview of recent progress. *Advances in Atmospheric Sciences*, 2007, **24** (6): 954~971
- [54] Yu Y, Zhi H, Wang B, et al. Coupled model simulations of climate changes in the 20th century and future. *Advances in Atmospheric Sciences*, 2008 (special issue, in press)
- [55] Solomon S, Qin D, Manning M, et al. Technical Summary. In: *Climate Change 2007: The Physical Science Basis*. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, Solomon, S., D. Qin, M. Manning, et al., Eds. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA. 2007
- [56] 姜大膀, 王会军, 郎咸梅. 全球变暖背景下东亚气候变化的最新情景预测. *地球物理学报*, 2004, **47**: 590~596
- [57] 姜大膀, 王会军, 郎咸梅. SRES A2 情景下中国气候未来变化的多模式集合预测结果. *地球物理学报*, 2004, **47**: 776~784
- [58] 姜大膀, 王会军. 20 世纪后期东亚夏季风年代际减弱的自然属性. *科学通报*, 2005, **50**: 2256~2262
- [59] Jiang D. Projected potential vegetation change in China under the SRES A2 and B2 scenarios. *Advances in Atmospheric Sciences*, 2008, **25**: 126~138
- [60] 张文君, 周天军, 宇如聪. 中国土壤湿度的分布与变化 I. 多种资料间的比较. *大气科学*, 2008, **32** (3): 581~597
- [61] 张文君, 宇如聪, 周天军. 中国土壤湿度的分布与变化 II. 耦合模式模拟结果评估. *大气科学*, 2008, 待发表
- [62] 严中伟, 杨赤. 近几十年中国极端气候变化格局. *气候与环境研究*, 2000, **5** (3): 267~272
- [63] 翟盘茂, 潘晓华. 中国北方近 50 年温度和降水极端事件变化. *地理学报*, 2003, **58** (增刊): 1~10
- [64] 李红梅, 周天军, 宇如聪. 近四十年我国东部盛夏日降水特性变化分析. *大气科学*, 2008, **32** (2): 358~370
- [65] Weisheimer A, Palmer T N. Changing frequency of occurrence of extreme seasonal temperatures under global warming. *Geophys. Res. Lett.*, 2005, **32** (L20721): 1~5
- [66] Meehl G A, Arblaster J M, Tebaldi C. Understanding future patterns of increased precipitation intensity in climate model simulations. *Geophys. Res. Lett.*, 2005, **32**, L18719, doi: 10.1029/2005GL023680
- [67] Gao Xuejie, Zhao Zongci, Ding Yihui, et al. Climate change due to greenhouse effects in China as simulated by a regional climate model. *Advances in Atmospheric Sciences*, 2001, **18** (6): 1224~1230
- [68] Gao Xuejie, Zhao Zongci, Filippo Giorgi. Changes of extreme events in regional climate simulations over East Asia. *Advances in Atmospheric Sciences*, 2002, **19** (5): 927~942



- [69] 高学杰, 徐影, 赵宗慈, 等. 数值模式不同分辨率和地形对东亚降水模拟影响的试验. *大气科学*, 2006, **30** (2): 185~192
- [70] Zhang Y, Xu Y, Dong W, et al. A future climate scenario of regional changes in extreme climate events over China using the PRECIS climate model. *Geophys. Res. Lett.*, 2006, **33**: 1~6
- [71] 李红梅. 近四十年中国盛夏降水和温度特性的观测和模拟分析. 中国科学院研究生院硕士学位论文, 2007. 63pp
- [72] 周天军. 全球海气耦合模式中热盐环流对大气强迫的响应. *气象学报*, 2003, **61** (2): 164~179
- [73] 周天军, Helge D. 卑尔根气候模式中大西洋热盐环流年代际与年际变率的气候影响. *大气科学*, 2005, **29** (2): 167~177
- [74] Wang Shaowu, Zhou Tianjun, Cai Jingning, et al. Abrupt climate change around 4 ka BP: Role of the thermohaline circulation as indicated by a GCM experiment. *Advances in Atmospheric Sciences*, 2004, **21** (2): 291~295
- [75] 周天军, 宇如聪, 刘喜迎, 等. 一个气候系统模式中大洋热盐环流对全球增暖的响应. *科学通报*, 2005, **50** (3): 269~275
- [76] McPhaden M J, Zhang D. Slowdown of the meridional overturning circulation in the upper Pacific Ocean. *Nature*, 2002, **415**: 603~608
- [77] 周天军, 俞永强, 刘喜迎, 等. 全球变暖形势下的北太平洋副热带-热带浅层环流的数值模拟. *自然科学进展*, 2005, **15** (3): 367~371
- [78] 周天军, 王在志, 宇如聪, 等. 基于 LASG/IAP 大气环流谱模式的气候系统模式. *气象学报*, 2005, **63** (5): 702~715
- [79] 周天军, 宇如聪, 王在志, 等. 大气环流模式 SAMIL 及其耦合模式 FGOALS\_s. 北京: 气象出版社, 2005. 288pp